

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT

PAR
ISABEL BERNIER-BOURGAULT

FACTEURS DÉTERMINANT LA SÉLECTION D'UN SITE DE FRAYE AINSI QUE
LES SUCCÈS D'ÉCLOSION ET D'ÉMERGENCE CHEZ L'OMBLE DE FONTAINE
(*SALVELINUS FONTINALIS*) DANS UNE FRAYÈRE AMÉNAGÉE

MAI 2001

2054

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

AVANT-PROPOS

Ce travail de recherche est présenté sous la forme d'un article scientifique. La présentation a été organisée de façon à respecter les recommandations aux auteurs de la revue *Environmental Biology of Fishes*. L'utilisation d'un incubateur spécialement fabriqué pour les besoins de ce projet a également mené à la rédaction d'un article scientifique qui sera soumis comme note à la revue *North American Journal of Fisheries Management*. Comme cette note n'était pas partie intégrante de mon projet de maîtrise et qu'elle a été faite en collaboration avec M. François Guillemette et mon directeur de recherche, M. Pierre Magnan, elle est présentée en annexe (ANNEXE A).

Comme l'article principal a été rédigés en anglais, un résumé substantiel en français est présenté suite au chapitre principal. La problématique du projet ainsi que la rétrospective de la littérature présentée dans le cadre du séminaire I (ECL-6005) mise à jour sont également jointes à ce mémoire.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier en premier lieu mon directeur, le Dr Pierre Magnan, principalement pour sa rigueur scientifique et sa détermination à toute épreuve. Je suis également reconnaissante de la confiance qu'il m'a accordée tout au long de la réalisation de ce travail de recherche. Je remercie également le Centre de recherche Gesti-Faune pour le précieux soutien financier et logistique qu'il m'a accordé. Merci à David Craig pour son enthousiasme tout au long de ce projet.

L'implication, la générosité et la patience de certaines personnes qui ont contribué à la réalisation de ce projet méritent d'être soulignées : Michel Baril, Ghyslain Bernier, Philippe Brodeur, Pierre East, Steve Garceau, François Guillemette, Simon Labrie, Gaston Lacroix, François Marchand, René Robert et Isabelle St-Onge.

Finalement, je tiens à remercier les gens du laboratoire ainsi que ma famille pour leur présence réconfortante, leurs conseils et aide.

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS	ii
REMERCIEMENTS	iii
TABLE DES MATIÈRES	iv
LISTE DES TABLEAUX.....	vi
LISTE DES FIGURES	vii
LISTE DES ANNEXES	viii
PROBLÉMATIQUE.....	1
RÉTROSPECTIVE DE LA LITTÉRATURE	3
Sélection d'un site de fraye	3
Construction du nid	5
Incubation des œufs.....	6
Circulation d'eau dans le substrat	6
Perméabilité du substrat	8
Diamètre du gravier.....	9
Émergence des larves	11
CHAPITRE PRINCIPAL: Factors affecting small-scale redd site selection, and hatching and emergence success of brook charr (<i>Salvelinus fontinalis</i>) on a managed spawning ground	14
Synopsis.....	15
Introduction	17
Materials and methods.....	18

Study site	18
Experimental design	19
Egg incubation.....	19
Water quality	20
Hydrological characteristics.....	21
Substrate analysis	21
Statistical analysis	23
Results	23
Site characteristics.....	23
Hatching and emergence success	25
Discussion.....	26
Acknowledgements	30
References cited.....	30
RÉSUMÉ DÉTAILLÉ EN FRANÇAIS.....	43
Introduction	44
Matériel et méthodes	45
Analyses statistiques.....	47
Résultats.....	47
Discussion.....	50
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES DE LA RÉTROSPECTIVE DE LA LITTÉRATURE	52
ANNEXE A	55

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Mean temperature, dissolved oxygen, and conductivity of surface and interstitial water during spawning, incubation, and emergence periods.....	34
Tableau 2. Mean surface water velocity and depth during spawning, incubation, and emergence periods at selected and non-selected sites.....	35
Tableau 3. Mean interstitial water flow during the spawning, incubation, and emergence periods at selected and non-selected sites in 1997 (sampling depth: 25-35 cm) and in 1998 (sampling depth: 5-15 cm).....	36
Tableau 4. Geometric mean diameter (Dg), geometric standard deviation (So) of particles, fredle Index of substrate and sediment loading at selected and non-selected sites.....	37
Tableau 5. Mean percent hatching and emergence (\pm SD) at selected and non-selected sites and in astro-turf TM , and in selected and non-selected substrates.....	38

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Schematic representation of the experimental design. Cylinders represent the incubators.....	40
Figure 2. Mean proportion of particle size classes (diameter, mm) at selected and non-selected sites.....	41
Figure 3. Mean cumulative proportion of particle size classes at selected and non-selected sites.....	42

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1. A new incubator for salmonid eggs incubation and collection of emergent larvae.....	55
---	----

PROBLÉMATIQUE

Des études récentes ont démontré que la sélection d'un site de fraye par l'omble de fontaine (*Salvelinus fontinalis*) est liée à l'émergence d'eau souterraine (Webster et Eiriksdottir 1976, Fraser 1982, 1985, Witzel et MacCrimmon 1983a, Snucins et al. 1992, Blanchfield et Ridgway 1997, Essington et al. 1998). Une bonne circulation d'eau dans le substrat régulariserait la température, les propriétés chimiques et l'hydrologie du nid (Fraser 1985, Gunn 1986, Snucins et al. 1992, Curry et al. 1995). La disponibilité d'un substrat composé de gravier adéquat peut également limiter la reproduction de l'omble de fontaine en rivière (Kondolf et Wolman 1993). Une grande quantité de sédiments fins dans les interstices du gravier réduit la perméabilité et donc l'apport d'eau oxygénée pendant l'incubation des œufs (Witzel et MacCrimmon 1983b; Chapman 1988; Kondolf et al. 1993). Il est important que les efforts consentis au maintien et à l'augmentation des populations indigènes d'omble de fontaine en rivière tiennent compte de l'écologie de la reproduction de ce salmonidé.

L'omble de fontaine subit chaque année une très grande pression de pêche. La province de Québec compte plus d'un million d'adeptes de la pêche récréative annuellement. Ces pêcheurs ont dépensé 570 millions de dollars en 1994 faisant de ce sport une activité économique de première importance (Pêches et Océans Canada 1995). Le relief très plat du bouclier laurentien favorise rarement les conditions optimales de courant et de granulométrie pour la reproduction de l'omble de fontaine dans ses tributaires et émissaires. Comme la majorité des populations d'omble de fontaine se retrouve sur le

bouclier laurentien. l'aménagement de frayères représente une avenue intéressante dans la volonté de supporter la forte pression de pêche exercée sur l'omble de fontaine. C'est dans cette optique que les responsables du lac St-Michel (Québec) ont décidé d'aménager une frayère dans la principale décharge du lac en 1987 (Craig et Dulude 1995). Jusqu'à présent, peu d'études ont été faites en nature sur les conditions de reproduction de l'omble de fontaine en rivière (Witzel et MacCrimmon 1983a-b, Snucins et al. 1992, Curry et Noakes 1995, Curry et al. 1995, Essington et al. 1998).

L'objectif principal de cette étude était d'étudier les facteurs contribuant à la sélection d'un site de fraye à petite échelle, l'éclosion ainsi que l'émergence chez l'omble de fontaine. Pour ce faire, l'effet et la contribution relative de différents facteurs ont été déterminés sur ces variables : la vitesse du courant, la profondeur, la résurgence d'eau souterraine, la granulométrie du substrat et la physico-chimie de l'eau de surface et interstitielle. Ces observations permettront de reproduire les conditions optimales lors d'aménagements futurs.

RÉTROSPECTIVE DE LA LITTÉRATURE

Sélection d'un site de fraye

La sélection d'un site de fraye est associée par plusieurs auteurs aux résurgences. Webster et Eiriksdottir (1976) ont observé des ombles de fontaine sélectionnant un site de fraye situé très près d'une zone de résurgence dans 21 des 22 cas étudiés. Cette étude, qui a été réalisée en laboratoire, indique que le choix d'un site de fraye dépend davantage sur la présence d'une zone de résurgence que sur la composition du substrat. Des sites composés de sable situés sur une zone de résurgence étaient couramment utilisés même si du gravier adéquat était disponible ailleurs. Une situation semblable a été observée par Fraser (1982). Son étude, qui s'est déroulée sur trois saisons de reproduction, a également mis en évidence l'importance des résurgences dans la sélection d'un site de fraye par l'omble de fontaine. Des femelles ont été observées frayant sur un substrat composé par un amas de débris de 30 cm d'épaisseur. Ce substrat atypique a été sélectionné à cause de la présence d'une résurgence. Witzel et MacCrimmon (1983a) suggèrent que l'omble de fontaine fraye exclusivement sur des zones de résurgence et principalement là où la vitesse de courant de la rivière ne dépasse pas 42 cm/s. Des études effectuées plus récemment confirment l'importance des résurgences dans la sélection d'un site de fraye (Snucins et al., 1992; Curry et Noakes, 1995; Blanchfield et Ridgway, 1997).

L'étude effectuée par Curry et Noakes (1995) indique que les résurgences peuvent influencer le comportement de "homing" mais elles ne peuvent influencer le choix précis de l'emplacement du nid. Ces auteurs suggèrent que l'eau souterraine pourrait produire

des gradients physique, chimique ou de température dans l'eau de surface qui seraient utilisés dans la recherche d'une aire de reproduction. La capacité à détecter ces gradients serait fonction de leur intensité soit la vitesse à laquelle la résurgence a lieu. Cependant, cette étude n'a pu déterminer lequel ou lesquels de ces gradients seraient impliqués dans le choix d'un site. Curry et Noakes (1995) suggèrent que l'omble de fontaine peut détecter les zones de résurgence mais que si les conditions physiques, thermiques et chimiques minimales sont satisfaites, l'emplacement d'un site pour la construction du nid pourrait être sélectionné en utilisant des stimuli visuels ou tactiles (composition du substrat). Leurs observations indiquent que l'ordre d'arrivée des géniteurs sur un site détermine l'emplacement du nid étant donné le nombre limité d'habitat adéquat.

L'importance du couvert végétal dans la sélection d'un site de fraye est peu documentée. Witzel et MacCrimmon (1983a) ont illustré brièvement l'importance de ce facteur. Ils ont observé que 96% des nids étaient à moins de 1.5 mètre d'un couvert végétal. Ils ont également observé que l'omble de fontaine frayait en moyenne dans 25 cm de profondeur en rivière. Récemment, Essington et al. (1998) ont démontré que la sélection d'un site de fraye serait influencée par la présence d'autres nids. En effet, la superposition de nids ne serait pas liée à la disponibilité de l'habitat mais bien à une préférence de l'omble de fontaine pour frayer sur un nid déjà existant.

En résumé, le processus de la sélection d'un site de fraye est encore mal connu, bien que des percées récentes aient été faites. Il semble que l'omble de fontaine soit attiré par

l'émergence d'eau souterraine. Les stimuli visuels et tactiles viendraient en second lieu et seraient utilisés une fois que le besoin de résurgence serait comblé.

Construction du nid

Selon Chapman (1988), le nid de l'omble de fontaine en rivière est constitué d'une poche dans laquelle la femelle a retiré les particules fines et le petit gravier par des mouvements de flexion rapides et répétés du corps. Le courant transporte les plus petites particules soulevées tandis que le petit gravier se dépose en formant un amas en aval de la poche. La taille des particules soulevées dépend de la taille de la femelle et de la composition du substrat. La femelle dépose ensuite les œufs dans la poche et le mâle les fertilise simultanément. La femelle recommence immédiatement après à creuser en amont de la poche. Encore une fois, le courant transporte les particules soulevées et les plus grosses se déposent sur la poche ou encore sur l'amas formé précédemment.

Le fond de la poche contenant les œufs est constitué de roches ou de gravier qui étaient trop gros pour être soulevés par la femelle. Les interstices formés par ces roches constitueraient un habitat favorable pour le développement des embryons. La poche formée par la femelle contient moins de particules fines que le substrat qui l'entoure. Cependant, lorsque la femelle a terminé son opération de nettoyage, des particules fines se déposent inévitablement sur le nid soit par l'activité des autres femelles ou encore par sédimentation naturelle. Cette sédimentation peut ramener le substrat à son état original.

Incubation des œufs

Circulation d'eau dans le substrat

La circulation d'eau dans le substrat pendant l'incubation permet un apport constant d'oxygène et le retrait des métabolites rejetés par les embryons (Coble, 1961). Chapman (1988) mentionne dans sa revue de littérature que de faibles concentrations d'oxygène dissous et des échanges d'eau réduits augmenteraient la mortalité des embryons et qu'une exposition à de faibles concentrations d'oxygène entraînerait des éclosions prématurées. L'étude de Coble (1961), effectuée dans deux rivières de l'Oregon, suggère qu'il y aurait une corrélation positive entre la vitesse de l'eau souterraine et la survie des embryons de truite arc-en-ciel (*Oncorhynchus mykiss*). Selon Coble, la vitesse et la concentration d'oxygène seraient étroitement liées dans l'eau circulant dans le substrat.

Pollard (1955) a toutefois observé que l'apport d'oxygène à l'intérieur d'un nid dépend de sa concentration dans l'eau souterraine et de la vitesse à laquelle cette eau circule dans le substrat. Il serait donc possible pour des embryons d'être oxygénés même si la circulation d'eau dans le substrat est faible. Sowden et Power (1985) ont fait une étude sur la survie des embryons de truite arc-en-ciel (*Oncorhynchus mykiss*) dans un tributaire du lac Érié en Ontario. Ils ont observé que l'effet combiné de la concentration ambiante d'oxygène et la vitesse à laquelle l'eau circule dans le gravier explique près de 70% de la variation dans la survie des embryons. Toutefois, l'effet unique de la concentration ambiante d'oxygène explique 61% de la variabilité. Ces observations indiquent que la concentration d'oxygène dans l'eau souterraine est le facteur important influençant l'apport d'oxygène et la survie des embryons. Les auteurs suggèrent que la vitesse à laquelle l'eau circule dans le substrat peut limiter l'apport d'oxygène et donc la survie,

lorsque la concentration d'oxygène est inférieure à 5 mg/L. Cependant, la survie des embryons ne semble pas être reliée à la vitesse de l'eau dans le substrat lorsque la concentration d'oxygène est supérieure à 5.2 mg/L. Dans le même sens, Coble (1961) mentionne que la survie des embryons est reliée à la vitesse de l'eau souterraine mais de façon indirecte, soit à travers la concentration d'oxygène dissous. Les embryons auraient besoin d'oxygène et non d'un courant souterrain.

Snucins et al. (1992) ont observé que le contenu en oxygène de l'eau souterraine du lac Joe en Ontario était, pour toute la période de l'étude, supérieur à 8.2 mg/L. Ils ont également observé que du 14 février au 2 juillet, la température de l'eau souterraine a varié entre 3.0 et 7.2°C alors que celle de surface a varié entre 0.5 et 19.2°C. Pour la même période, le pH de l'eau souterraine est resté relativement stable (5.4-5.6) alors que celui de l'eau de surface a varié de 4.4 à 6.3 et a connu une dépression pendant l'hiver et le début du printemps. Curry et al. (1995) ont également observé que les caractéristiques physiques et chimiques du nid restaient semblables tout au long de la période d'incubation mais qu'elles n'étaient pas différentes de celles mesurées 100 cm plus loin, dans le substrat où il n'y avait pas de nids.

Tel que mentionné par Curry et al. (1995), les résurgences sont également importantes dans la protection physique du nid. Elles empêchent l'infiltration d'eau de surface et de glace durant l'hiver.

Pour toutes ces raisons, la présence d'eau souterraine dans l'habitat de fraye et d'incubation serait critique pour le succès de reproduction de l'omble de fontaine (Curry et al., 1994).

Perméabilité du substrat

La survie des embryons pendant l'incubation dépend aussi de la perméabilité du substrat. La perméabilité représente la capacité du gravier à laisser passer l'eau par unité de temps (Chapman, 1988). Sa valeur augmente lorsque le diamètre géométrique moyen des particules augmente. La perméabilité permet à l'eau de circuler mais c'est la différence de pression entre deux points dans le substrat qui cause la circulation (Pollard, 1955). Pour que l'eau passe dans le gravier, la pression de l'eau souterraine en amont doit être plus élevée que celle en aval à une même élévation. La pression diminue ainsi dans la direction du courant. Cette perte de pression par unité de temps est appelée le gradient hydraulique (Pollard, 1955). Un substrat perméable peut donc être saturé d'eau mais il n'y aura pas de courant s'il n'y a pas de différence de pression (Pollard, 1955).

Une faible perméabilité du substrat réduit la circulation d'eau autour des embryons. Ceci entraîne une baisse dans l'apport d'oxygène aux embryons et une accumulation des métabolites rejetés (Tappel et Bjornn, 1983). Rubin et Glimsäter (1996) ont observé une corrélation positive entre la concentration d'oxygène dans l'eau interstitielle (survie des embryons) et la perméabilité du substrat. Cependant, les recherches effectuées par Sowden et Power (1985) indiquent que la survie des embryons n'était pas reliée à la composition du substrat ou à la perméabilité. La différence observée entre ces deux

situations pourrait s'expliquer par des concentrations différentes d'oxygène dans l'eau souterraine.

Diamètre du gravier

Chapman (1988) mentionne qu'une grande proportion de particules fines dans le substrat augmente la mortalité des embryons de salmonidés. Il mentionne également que les particules fines ont un diamètre inférieur à 6 mm mais que cette valeur peut être plus petite selon les études.

Lotspeich et Everest (1981) ont élaboré un indice qui qualifie le gravier, l'indice de fredle. Cet indice permet de comparer les données recueillies dans les études qui rapportent la composition du gravier de fraye.

Il se calcule de la façon suivante :

$$f_i = dg/S_o$$

où dg est le diamètre géométrique moyen des particules et S_o est le coefficient de tri qui se calcule de la façon suivante :

$$S_o = (d_{75}/d_{25})^{1/2}$$

où d_{75} et d_{25} sont les diamètres des particules à 75% et 25% du poids de l'échantillon.

Tel que mentionné précédemment, la survie des embryons dépend de l'apport d'oxygène, donc de la concentration d'oxygène dans l'eau souterraine et de la vitesse à laquelle l'eau circule dans le substrat. Selon Rubin (1995), la circulation de l'eau dépend entre autres de la composition du substrat. Les espaces interstitielles sont réduits dans les substrats

composés d'une grande proportion de particules fines ce qui contraint la circulation de l'eau. Les substrats composés d'une grande proportion de particules fines ont généralement une faible concentration d'oxygène dissous ce qui retarde le développement des embryons (Chapman, 1988).

Witzel et MacCrimmon (1983b) ont observé en laboratoire que la survie des embryons d'omble de fontaine et de truite brune (*Salmo trutta*) variait directement avec la grosseur du gravier et inversement avec la quantité de sable. Des taux de survie aussi faibles que 0 à 20% ont été observés dans du gravier de 6.2 mm de diamètre et moins et dans des mélanges de gravier contenant 60% ou plus de sable. Une relation similaire entre la survie des embryons de truite arc-en-ciel et la grosseur du gravier a été observée par Witzel et MacCrimmon (1981).

Dans l'étude effectuée en nature par Sowden et Power (1985), où la concentration d'oxygène a été identifiée comme étant le principal facteur influençant l'apport d'oxygène aux embryons, aucune relation n'a été remarquée entre la survie des embryons et la composition du substrat. La survie n'était pas significativement reliée au pourcentage de sédiments ayant un diamètre inférieur à 2 mm, au diamètre géométrique moyen des particules ou à l'indice de fredle. Dans ce cas-ci, la concentration d'oxygène variait indépendamment de la composition du substrat et la composition du substrat expliquait une faible proportion de la variation dans la vitesse de l'eau souterraine. Les auteurs rappellent que les modèles prédisant la survie des embryons basés uniquement sur

la composition du substrat ne sont pas suffisants dans les rivières où il y a des zones de résurgence.

En conclusion, l'oxygène semble bien être l'élément essentiel pour la survie des œufs. La circulation de l'eau dans le substrat permet à l'eau oxygénée d'accéder plus rapidement aux embryons et d'empêcher l'accumulation des métabolites. En général, un substrat perméable facilite cette circulation tandis que les particules fines la limitent.

Émergence des larves

Rubin et Glimsäter (1996) ont remarqué que la survie des œufs d'omble de fontaine jusqu'à l'éclosion dépend principalement de la concentration d'oxygène dans l'eau circulant dans le substrat. Cependant, le diamètre géométrique moyen des particules est le facteur le plus important dans la survie de l'éclosion jusqu'à l'émergence. En effet, il semble que la grosseur des particules et la perméabilité du substrat soient responsables des mouvements larvaires dans le substrat (Lotspeich et Everest 1981).

Hausle et Coble (1976) ont noté que le sable ralentissait l'émergence et réduisait le nombre de larves qui émergent chez l'omble de fontaine. Witzel et MacCrimmon (1983b) ont observé, également chez l'omble de fontaine, que le temps écoulé entre la première émergence et 50% des émergences variait directement avec la grosseur du gravier et inversement avec la concentration de sable. La même observation a été faite avec la durée de toute la période d'émergence. Les larves provenant d'un substrat composé de grosses

particules ont émergés plus tard et avaient une plus grande taille que les larves provenant de particules plus petites. Les auteurs croient que ces émergences prématurées pourraient être une réponse au stress occasionné par le confinement et l'anoxie imposés dans le gravier fin. Tappel et Bjornn (1983) ont également observé une relation inverse, bien que non significative, entre la quantité de particules fines et la taille des larves qui émergent. Les salmonidés provenant de substrats composés d'une grande proportion de sédiments fins ont émergés avant l'absorption complète du sac vitellin. Des relations similaires ont été observées chez le saumon atlantique par MacCrimmon et Gots (1986).

Selon Mason (1976), l'émergence serait induite par la résorption du sac vitellin et par un changement dans la photopériode. L'émergence coïnciderait avec la fonte des neiges et la chute du pH qui l'accompagne (Gunn, 1986; Snucins et al., 1992). La plupart des larves (>82%) observées par Snucins et al.(1992) ont émergées après la chute du pH. Cependant, il est possible que des larves qui émergent prématurément soient exposées à un environnement acide.

En résumé, l'émergence des larves d'omble de fontaine est contrainte par la quantité de particules fines dans le substrat. Afin d'éviter le confinement et l'anoxie, les larves qui émergent prématurément peuvent être soumises à un environnement acide, limitant ainsi leur chance de survie.

En conclusion, les effets de différents facteurs isolés (résurgence, proportion de particules fines, concentration d'oxygène, etc.) sur l'incubation et l'émergence des larves d'omble

de fontaine sont bien connus. Cette étude, par son plan expérimental particulier, vise à élucider l'importance relative de ces facteurs et de leurs interactions. De plus, elle permettra de documenter la sélection d'un site de fraye dont le processus est relativement peu connu.

CHAPITRE PRINCIPAL

Factors affecting small-scale redd site selection, and hatching and emergence success
of brook charr (*Salvelinus fontinalis*) on a managed spawning ground¹

Isabel Bernier-Bourgault & Pierre Magnan²

Département de chimie-biologie

Université du Québec à Trois-Rivières

C.P. 500, Trois-Rivières, Québec G9A 5H7, Canada

Pierre_Magnan@uqtr.quebec.ca

1: Contribution of the Centre de recherche Gesti-Faune inc.

2: Author to whom correspondence should be addressed

Key words: spawning, water velocity, groundwater flow, interstitial water, substrate,
granulometry, incubated eggs, *Salvelinus fontinalis*.

Synopsis

The objectives of the present study were to investigate factors contributing to small-scale redd site selection, and hatching and emergence success of brook charr, *Salvelinus fontinalis*, in running water. We measured microhabitat characteristics, and hatching and emergence success of eggs incubated in a series of spawning sites selected and not selected by brook charr in a lake outlet. Although significant, differences between the physico-chemistry of surface and interstitial water were small and did not suggest the presence of groundwater seepage. The mean surface water velocity was significantly higher in selected than non-selected sites during the incubation and emergence periods but not during the spawning period. No significant differences were observed between the depth of selected and non-selected sites for any sampling period. Differences in interstitial water flow between selected and non-selected sites were not consistent and did not exhibit a clear tendency. The geometric mean diameter of particles and fredle index of the substrate were significantly higher while the geometric standard deviation of particles was significantly lower in selected than in non-selected substrates. The proportion of fine particles was significantly higher in non-selected than selected sites and was correlated with sediment loading in incubators. A two-way ANOVA showed no significant effect of sites (selected versus non-selected) but did show a significant effect of the incubation substrate (Astro-turfTM, selected substrate, non-selected substrate) at both the hatching and emergence stages. The percentages of hatching and emergence were significantly higher in Astro-turfTM than in non-selected substrate with selected substrate being intermediate. The results of this study suggest that small-scale redd site selection by brook charr, on a managed spawning ground, is based on surface water

velocity and substrate characteristics (granulometry and proportion of fine particles) that in turn affect egg survival. Selected substrate was coarser, contained a lower proportion of fine particles, and showed higher hatching and emergence success than non-selected substrate.

Introduction

Many studies have shown that the presence of groundwater seepage is a determinant in redd site selection by brook charr (*Salvelinus fontinalis*) (Webster & Eiriksdottir 1976, Fraser 1982, 1985, Witzel & MacCrimmon 1983a, Snucins et al. 1992, Blanchfield & Ridgway 1997, Essington et al. 1998). Circulation of groundwater in the substrate stabilizes the thermal, chemical, and hydrological properties of the redd (Fraser 1985, Gunn 1986, Snucins et al. 1992, Curry et al. 1995). It also carries oxygen to embryos and metabolic wastes away from them. In streams, these functions are carried out by the moving water (Stuart 1953, Fraser 1985). Curry & Noakes (1995) reported that discharging groundwater may influence brook charr homing to spawning areas in lakes and creeks of the Canadian Shield, but that it does not influence the selection of individual redd sites.

The availability of suitable substrate can also influence redd site selection and spawning success of brook charr. Even though gravel is the most suitable substrate, brook charr have been observed spawning on atypical substrates in the presence of seeping groundwater (Fraser, 1982). However, a large proportion of fine sediments in the substrate reduces the inflow of oxygenated water to the embryos (Witzel & MacCrimmon 1983b, Chapman 1988). In contrast to what had been previously observed, Essington et al. (1998) reported that redd site selection was dictated by factors other than physical habitat preferences and that presence of existing redds would be an important component of redd site selection. The small-scale processes affecting redd site selection by brook charr and its impact on hatching and emergence success remain unclear. Improved

knowledge of the factors involved in small-scale redd site selection by brook charr is needed in the context of spawning ground improvement for the specie.

The objectives of this study were to investigate factors contributing to small-scale redd site selection as well as hatching and emergence success in brook charr on a managed spawning ground. We measured the relative importance of surface water velocity, groundwater flow, granulometry, and physico-chemistry of water on hatching and emergence success in a series of selected and non-selected spawning sites by brook charr, in a lake outlet that was managed to enhanced charr production.

Materials and methods

Study site

The experiments were conducted from 1997 to 1999 in the outlet of Lake St-Michel, Charlevoix (Québec) Canada (47°10'N, 71°02'W), at 840 m of altitude. The new outlet was artificially created and enhanced from 1986 to 1990, to increase the availability of spawning ground for brook charr. A channel of approximately 5 m wide and 150 m long was dig in 1986. The year after, a layer of 15-30 mm diameter particles was laid on the artificial outlet. From 1987 to 1990 ripe individuals were captured on natural spawning grounds of the lake and moved to the artificial spawning ground in order to initiate the reproductive cycle. Brook charr is the only known species in Lake St-Michel and its outlet.

Experimental design

In 1997 and 1998, we incubated eggs in 16 sites selected by spawning individuals and in 16 other sites that were not selected. The non-selected sites were situated less than 3 m away from each selected one. No individuals or redds were observed on the non-selected sites during the spawning period. Each pair of selected and non-selected sites was considered as a station that we estimated visually to be composed of similar substrate. By choosing non-selected sites on the basis of these criteria, we voluntarily reduced the differences between selected and non-selected sites and thus focused on small scale selection. To determine the relative contributions of the substrate and the hydrological factors, 100 eggs were incubated in selected and non-selected sites on (i) Astro-turfTM, (ii) selected substrate collected at the station, and (iii) non-selected substrate collected at the same station (Figure 1). Astro-turfTM is an artificial substrate that maximizes egg survival (Lachance et al. 2000).

Egg incubation

The incubators used in our experiments are described in Bernier et al. (2000). Therefore, only a brief description is presented here. These incubators are cylindrical (12.3 cm height x 8.1 cm diameter) and made of a PVC grid (slots of 20 mm x 1.5 mm) that allows water to flow through from all directions. To catch the emergent larvae, a fry trap was set on the top of each incubator. The traps (10.0 height cm x 8.1 cm diameter), also made of PVC, were fixed over the incubator with a coupler. A funnel inside the trap guides the emergent larvae into the fry trap.

In 1997, ripe individuals were captured with a seine (10m x 1.5m x 1cm) in a pool located in a tributary of Lake St-Michel. Males and females were kept separately in enclosures until artificial fertilization using the dry method (Piper et al. 1982). In 1998, the spawning period lasted only a few days. This unusual situation led to a lack of sexual products for our experiments. We thus used embryos from another lake situated 45 km from Lake St-Michel (Lake Banville, Réserve faunique des Laurentides, Québec, Canada (47°37'N, 71°16'W)) at three stations. The incubators were inserted into the ground after the hole had been dug with a small shovel. This technique avoided substrate compaction around the incubators. The removed substrate was used as incubation substrate in some of the incubators.

Water quality

Dissolved oxygen ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) and water temperature ($^{\circ}\text{C}$) were measured in the surface water and in the substrate (5-15 cm) with a YSI oxymeter (model 57) and conductivity ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) was measured with a YSI conductivimeter (model 33). The probes were placed in a Teflon pipe, whose end was pointed and perforated to let water enter, for measurements in the substrate. Since Teflon is an inert material, it does not influence oxygen measurements. The pipe was inserted to a depth of 5 to 15 cm into the substrate, the depth at which eggs were incubated. The interstitial water was hand pumped into the pipe to assure that the water close to the probe was coming from the desired depth and not from surface water.

Hydrological characteristics

Surface water velocity was measured at 10 cm from the bottom with a Price-type Mini current meter (model 1205). The groundwater flow was measured with two mini-piezometers inserted at each site amid the three incubators. The mini-piezometers consisted of 10 cm long slotted polyethylene tubes (9.6 mm o.d., 6.4 mm i.d.) wrapped with 1 mm nitex screen to prevent infiltration of fine particles (Curry & Noakes 1995). In 1997, the mini-piezometers were inserted into the substrate following the procedure described by Lee & Cherry (1978) to sample water between 25 and 35 cm in the sediment. Based on the 1997 results, we adjusted the 1998 sampling to between 5 and 15 cm in depth (see results section). The groundwater flow in the substrate was calculated using Darcy's formula:

$$Q = A \frac{dh}{dl} K$$

where Q is the flux of groundwater ($\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), A is the area through which flow occurs (cm^2), dh/dl is the hydraulic gradient (unitless), and K is the hydraulic conductivity of the substrate ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$). These hydrological properties were calculated following the procedures of Lee & Cherry (1978).

Substrate analysis

At each site, the substrate was sampled with a 15 cm diameter x 50 cm length McNeil sampler (McNeil & Ahnell 1960). Three sieves with mesh sizes of 1 cm, 500 μm , and 100 μm were superimposed at one end of the tube. The sampling occurred in a

homogeneous section of each site. In sites selected by spawning individuals, samples were taken in the redd or beside it but not in the egg pocket. Young et al. (1989) noted that sampling the substrate with a shovel or a McNeil sampler does not allow the detection of significant differences in substrate composition outside and within redds (excluding egg pockets). We thus assumed that substrate sampled beside or within the redds in selected sites was representative of substrate before spawning. After processing the dry samples through a stack of 25, 16, 8, 4, 2, and 1 mm sieves, the percent of fine particles (<1 mm) was estimated by weight (± 0.1 g). Particles with a diameter greater than 48 mm were excluded from samples for reasons of weight bias as discussed by Adams & Beschta (1980). The geometric mean diameter of particles (D_g) was calculated following Lotspeich & Everest (1981) as:

$$D_g = (d_1^{w_1} \times d_2^{w_2} \times \dots \times d_n^{w_n})$$

where d_n is the median diameter of particles retained by the n^{th} sieve and w_n is the decimal fraction of the particle weight retained by the n^{th} sieve.

The Fredle index was also calculated following Lotspeich & Everest (1981) as:

$$f_i = d_g / S_o$$

where d_g is geometric mean diameter of particles (described above) and $S_o = (d_{75} / d_{25})^{1/2}$, that is, particle diameter at the 75th and 25th percentiles of the cumulative substrate sample weight. Particles accumulated in the Astro-turfTM at the end of the experiment were dried and weighed (± 0.1 g) to estimate the sediment loading during the incubation period.

Statistical analysis

Mean dissolved oxygen, water temperature and conductivity were compared between surface and interstitial water with Student's paired *t*-tests (Sokal & Rohlf 1981). Surface and interstitial water velocity; depth; proportion of particle diameter; and geometric mean particle diameter were compared between selected and non-selected sites with Student's *t*-tests (Sokal & Rohlf 1981). Fredle index, So, and sediment loading were compared with Mann-Whitney *U*-tests (Sokal & Rohlf 1981). The effects of substrates (Astro-turfTM, selected, and non-selected substrates) and sites (selected and non-selected) were investigated with a two-way analysis of variance followed by multiple sample Tukey comparison tests (Sokal & Rohlf 1981). The homogeneity of variances was tested with an F_{\max} -test (Sokal & Rohlf 1981); when variances were heterogeneous, raw data were $\log(x)$ transformed while percent data were arcsine transformed prior to analysis. Even after transformation, the variance of some data sets were heterogeneous. We assumed that these departures from the assumption of homogeneity of variance had no marked effect on the significance level of *t*-tests and ANOVA (see Sokal & Rohlf 1981). All statistical analysis were performed with SYSTAT software (version 8.0).

Results

Site characteristics

The mean temperature was significantly higher in surface than in interstitial water during the incubation and emergence periods but not during the spawning period (spawning

period: $t = 0.69$, $p > 0.05$; incubation period: $t = 3.22$, $p < 0.01$; emergence period: $t = 2.75$, $p < 0.01$; Table 1). Dissolved oxygen in the surface water was significantly higher than in the interstitial water for all periods (spawning period: $t = 5.33$, $p < 0.001$; incubation period: $t = 5.68$, $p < 0.001$; emergence period: $t = 6.69$, $p < 0.001$; Table 1). Conductivity was significantly higher in surface than in interstitial water during the emergence period only (spawning period: no data available; incubation period: $t = 1.53$, $p > 0.05$; emergence period: $t = 4.70$, $p < 0.001$; Table 1). The mean surface water velocity was significantly higher in selected than in non-selected sites during the incubation and emergence periods but not during the spawning period (spawning period: $t = 1.52$, $p > 0.05$; incubation period: $t = 4.85$, $p < 0.001$; emergence period: $t = 4.37$, $p < 0.001$; Table 2). No significant differences were observed between the depth of selected and non-selected sites for any sampling period (spawning period: $t = 1.04$, $p > 0.05$; incubation period: $t = 0.34$, $p > 0.05$; emergence period: $t = 0.38$, $p > 0.05$; Table 2). In 1997, the mean interstitial water flow (measured at 25-35 cm) was significantly higher in non-selected than in selected sites during the spawning period only (spawning period: $t = 2.15$, $p < 0.05$; incubation period: $t = 1.52$, $p > 0.05$; emergence period: $t = 1.55$, $p > 0.05$; Table 3). In 1998, the mean interstitial water flow (measured at 5-15 cm) was significantly higher in selected than in non-selected sites during incubation period only (spawning period: no data available; incubation period: $t = 2.47$, $p < 0.05$; emergence period: $t = 1.35$, $p > 0.05$; Table 3).

Particles < 1 mm, from 1 to 1.99 mm, and from 2 to 3.99 mm were significantly more abundant in non-selected than in selected sites (< 1 mm: $t = 3.08$, $p < 0.01$; 1-1.99 mm: $t = 3.33$, $p < 0.01$; 2-3.99 mm: $t = 2.53$, $p < 0.05$; 4-7.99 mm: $t = 0.98$, $p > 0.05$; 8-15.99

mm: $t = 1.24$, $p > 0.05$; 16-24.99 mm: $t = 1.94$, $p > 0.05$; >25 : $t = 0.28$, $p > 0.05$; Figure 2). Cumulative percent of particles finer than 1, 2, 4, and 8 mm were significantly higher in non-selected than in selected sites (<1 : $t = 3.08$, $p < 0.01$; <2 : $t = 3.29$, $p < 0.01$; <4 : $t = 3.28$, $p < 0.01$; <8 : $t = 2.90$, $p < 0.01$; <16 : $t = 1.54$, $p > 0.05$; <25 : $t = -0.06$, $p > 0.05$; Figure 3). The geometric mean diameter of particles (D_g) and fredle index were significantly higher in selected than in non-selected substrate (D_g : $t = 2.94$, $p < 0.01$; fredle index: $U = 57.00$, $p < 0.01$; Table 4). In contrast, the geometric standard deviation of particles (S_o) in the substrate was significantly higher in non-selected than in selected substrate ($U = 199.00$, $p < 0.01$; Table 4). Sediment loading was not significantly different between selected and non-selected sites ($U = 56.00$, $p > 0.05$; Table 4). However, the sediment loading in the incubators was correlated with the proportion of particles finer than 1 and 2 mm in the substrate during the incubation period (1 mm: $r = 0.49$, $p < 0.05$; 2 mm: $r = 0.45$, $p < 0.05$).

Hatching and emergence success

The two-way ANOVA showed no significant site effect on hatching or emergence success (selected versus non-selected; hatching: $F = 0.62$; $p > 0.05$; emergence: $F = 1.08$, $p > 0.05$) but did show a significant effect of the incubation substrate (Astro-turfTM, selected substrate, non-selected substrate) at both the hatching and emergence stages (hatching: $F = 4.93$, $p < 0.01$; emergence: $F = 3.51$, $p < 0.05$; Table 5). The interactions between site and incubation substrate were not significant at hatching and emergence stages ($p > 0.05$; Table 5). An a posteriori Tukey multiple sample comparison test showed

that percent of hatching and emergence were significantly higher in Astro-turfTM than in non-selected substrate with selected substrate being intermediate.

Discussion

Although significant, differences observed between the physico-chemistry of the surface and interstitial waters were small and do not suggest the presence of groundwater seepage. Interstitial water flow is rather due to surface water flowing through the substrate in streams (Fraser 1985). This kind of water supply offers less stable conditions for the eggs because temporal variations in surface water temperatures are larger than those in groundwater. Curry et al. (1995) observed temperatures ranging from 2.0 to 6.2°C and from 2.7 to 8.0°C in redds with groundwater discharge in Dickson and Meach lakes (Ontario, Canada). At the same time, surface water ranged from -1.5 to 6.4°C and from 0 to 7.9°C respectively. In December, they observed a temperature of 4.7°C in redds with groundwater discharge compared to 0.2°C in surface water. In July, Fraser (1982) observed a temperature of 11.4°C in groundwater compared to 18.8°C in surface water in a Canadian Shield lake. Interstitial water temperature ranged from 0.5 to 14.5°C in our study.

Depth did not appear to be a determinant in the spawning site selection. This may be due to the fact that non-selected sites were chosen close (< 3 m) to selected ones and that other factors related to micro habitat were more important. In contrast to depth, surface water velocity was significantly higher in selected than in non-selected sites during the incubation and emergence periods but not during the spawning period. It is possible that

high variance combined with low sample size ($n = 16$) did not allow us to detect significant differences in surface water velocity of selected and non-selected sites during the spawning periods. In a study at the same site, Baril (1999) found that surface water velocity was significantly higher ($p < 0.005$) at selected ($18.5 \pm 11.5 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$, $n = 42$) than at non-selected ($11.5 \pm 12.1 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$, $n = 36$) sites during the spawning period of 1996.

The mean depth ($49.18 \pm 11.65 \text{ cm}$) and surface water velocity ($24.21 \pm 19.29 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$) selected by brook charr were relatively deeper and higher compared to values reported in other studies. Smith (1973) observed brook charr redds at a mean depth of 24.9 cm ($\pm 47.0 \text{ cm}$) and with a mean water velocity of $11.2 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ($\pm 27.7 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$). Recently, Essington et al. (1998) observed brook charr redds at depths ranging from 36 to 46 cm and surface water velocity ranging from 13 to $21 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ in a section of Valley Creek (Minnesota, USA) containing both brook charr and brown trout (*Salmo trutta*) redds. The difference between these values and those we observed may be explained by the fact that brook charr is the only species in our study area. The selection of a redd site is thus not influenced by competitive pressure. The mean depth and water velocity selected by brook charr in our study insure that water will flow over redds during the incubation period. Other shallower sites may freeze or allow frazil accumulations from top to bottom during winter.

Observed differences in interstitial water flow between selected and non-selected sites were not consistent and did not exhibit a clear tendency. Webster & Eriksdottir (1976) suggested that gradients produced by discharging groundwater can be detected by brook charr. When thermal and chemical gradients do not exist, only discharging interstitial water gradient can be detected. Our results may indicate that the discharge of interstitial

water was not determinant in the selection of a spawning site or that the minimum criteria were satisfied in the spawning area. In such situations, Curry & Noakes (1995) suggested that redd site selection may be made using visual or tactile stimuli like substrate composition.

We found the proportion of fine sediments to be a determinant of redd site selection. Their proportions were significantly higher at non-selected than selected sites and they were correlated with sediment loading in incubators. This suggests that the influx of fine particles onto the spawning ground should be limited to avoid their accumulation in redds and thus egg asphyxia. It has been documented that fine sediments reduce oxygen delivery to embryos and thus reduce survival (Hausle & Coble 1976, Witzel & MacCrimmon 1983b, Chapman 1988, Argent & Flebbe 1999). The smaller proportion of fine particles in selected substrate resulted in a higher geometric mean diameter of particles (D_g) and fredle index of substrate. Selected substrate was then coarser and more homogenous than non-selected substrate, which is more favorable for successful reproduction (Lotspeich & Everest 1981). However, substrate selected by brook charr in the Lake Saint-Michel outlet was coarser than observed in other studies. For example, Witzel & MacCrimmon (1983a) measured a geometric mean diameter of 5.71 mm (\pm 2.31 mm) in redds used by brook charr in streams of Ontario, which is half of the one measured in this study. Furthermore, geometric mean diameter of particles (D_g) and fredle index measured at selected sites were respectively 4.7 and 7.7 time higher than those measured at redd periphery (0-20 cm layer) by Snucins et al. (1992). The non-selected sites exhibited even coarser substrate than those measured at redd periphery in Chikanishing Creek, with D_g and fredle index respectively 3.2 and 4.1 times higher.

These differences from other studies may be due to the fact that the diameter of particles used to enhance the spawning ground of Lake Saint-Michel outlet ranged from 15 to 30 mm.

The results presented above suggest that surface water velocity and substrate characteristics (granulometry and proportion of fine particles) were involved in redd site selection by brook charr. However, other factors may also be involved. Essington et al. (1998) found that females exhibited a preference for spawning on existing redd sites that was not related to habitat availability.

Results of hatching and emergence success indicate that egg survival is more closely associated with substrate than with other site characteristics. The percent of hatching and emergence were significantly higher in Astro-turfTM than in non-selected substrate with selected substrate being intermediate.

In conclusion, our results suggest that small-scale redd site selection by brook charr is mainly based on surface water velocity and substrate characteristics (granulometry and proportion of fine particles) that in turn have an effect on egg survival, on a managed spawning ground. However, the artificial character of the study site prevent the extension of these conclusions to natural streams. Even if the study site has been submitted to natural conditions for 10 years, the initial enhancement reduced natural variations of physical properties, which may have restricted redd site selection. However, selected substrate was coarser, contained a lower proportion of fine particles, and had higher hatching and emergence success than non-selected substrate. Spawning ground enhancement should thus focus on substrate quality and reduction of sediment loading during the incubation period.

Acknowledgements

We thank M. Baril, G. Bernier, P. Brodeur, P. East, S. Garceau, F. Guillemette, S. Labrie, G. Lacroix, F. Marchand and I. St-Onge for their field assistance. This study was primarily supported by the Centre de recherche Gesti-Faune inc. Secondary funds were provided by the Natural Sciences and Engineering Research Council (NSERC) of Canada to P. Magnan.

References cited

- Adams, J.N. & R.L. Beschta. 1980. Gravel bed composition in Oregon coastal streams. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 37: 1514-1521.
- Argent, D.G. & P.A. Flebbe. 1999. Fine sediment effects on brook trout eggs in laboratory streams. *Fish. Res.* 39: 253-262.
- Baril, M. 1999. Écologie et comportement reproducteur de l'omble de fontaine, *Salvelinus fontinalis*, dans une frayère aménagée. Master's Thesis, Université du Québec à Trois-Rivières, Trois-Rivières. 51 pp.
- Bernier, I. F. Guillemette & P. Magnan. 2000. A new incubator for salmonid eggs incubation and collection of emergent larvae. *North Am. J. Fish. Manag.* (submitted).
- Blanchfield, P.J. & M.S. Ridgway. 1997. Reproductive timing and use of redd sites by lake-spawning brook trout (*Salvelinus fontinalis*). *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 54: 747-756.

- Chapman, D.W. 1988. Critical review of variables used to define effects of fines in redds of large salmonids. *Trans. Am. Fish. Soc.* 117: 1-21.
- Curry, R.A. & D.L.G. Noakes. 1995. Groundwater and the selection of spawning sites by brook trout (*Salvelinus fontinalis*). *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 52: 1733-1740.
- Curry, R.A., D.L.G. Noakes & G.E. Morgan. 1995. Groundwater and the incubation and emergence of brook trout (*Salvelinus fontinalis*). *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 52: 1741-1749.
- Essington, T.E., P.W. Sorenson & D.G. Paron. 1998. High rate of redd superimposition by brook trout (*Salvelinus fontinalis*) and brown trout (*Salmo trutta*) in a Minnesota stream cannot be explained by habitat availability alone. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 55: 2310-2316.
- Fraser, J.M. 1982. An atypical brook charr (*Salvelinus fontinalis*) spawning area. *Env. Biol. Fish.* 7: 385-388.
- Fraser, J.M. 1985. Shoal spawning of brook trout, *Salvelinus fontinalis*, in a precambrian shield lake. *Naturaliste Can.* 112: 163-174.
- Gunn, J.M. 1986. Behaviour and ecology of salmonid fishes exposed to episodic pH depressions. *Env. Biol. Fish.* 17: 241-252.
- Hausle, D.A. & D.W. Coble. 1976. Influence of sand in redds on survival and emergence of brook trout (*Salvelinus fontinalis*). *Trans. Am. Fish. Soc.* 105: 57-63.
- Lachance, S., P. Bérubé & M. Lemieux. 2000. In situ survival and growth of three brook trout strains, *Salvelinus fontinalis*, subjected to acid conditions of anthropogenic origin at the egg and fingerling stages. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 57(8): 1562-1573.

- Lee, D.R. & J.A. Cherry. 1978. A field exercise on groundwater flow using seepage meters and mini-piezometers. *Journal of Geological Education* 27: 6-10.
- Lotspeich, F.B. & F.H. Everest. 1981. A new method for reporting and interpreting textural composition of spawning gravel. U.S. For. Serv. Res. Note PNW-369.
- McNeil, W.J. & W.H. Ahnell. 1960. Measurement of gravel composition of salmon stream beds. University of Washington, Seattle, WA, Circ. 120: 7 pp.
- Piper, R.G., I.B. McElwain, L.E. Orme, J.P. McCraren, L.G. Fowler & J.R. Leonard. 1982. Fish hatchery management. U.S. Department of the Interior, Fish and Wildlife Service, Washington. 517 pp.
- Smith, A.K. 1973. Development and application of spawning velocity and depth criteria for Oregon Salmonids. *Trans. Amer. Fish. Soc.* 102: 312-316.
- Snucins, E.J., R.A. Curry & J.M. Gunn. 1992. Brook trout (*Salvelinus fontinalis*) embryo habitat and timing of alevin emergence in a lake and a stream. *Can. J. Zool.* 70: 423-427.
- Sokal, R.R. & F.J. Rohlf. 1981. Biometry. 2nd ed. Freeman and Company, San Francisco, CA. 859 p.
- Stuart, T.A. 1953. Water currents through permeable gravels and their significance to spawning salmonids. *Nature, London*, 172: 407-408.
- Webster, D.A. & G. Eiriksdottir. 1976. Upwelling water as a factor influencing choice of spawning sites by brook trout (*Salvelinus fontinalis*). *Trans. Am. Fish. Soc.* 105: 416-421.
- Witzel, L.D. & H.R. MacCrimmon. 1983a. Redd-site selection by brook trout and brown trout in southwestern Ontario streams. *Trans. Am. Fish. Soc.* 112: 760-771.

- Witzel, L.D. & H.R. MacCrimmon. 1983b. Embryo survival and alevin emergence of brook charr, *Salvelinus fontinalis*, and brown trout, *Salmo trutta*, relative to redd gravel composition. Can. J. Zool. 61: 1783-1792.
- Young, M.K., W.A. Hubert & T.A. Wesche. 1989. Substrate alteration by spawning brook trout in a southeastern Wyoming stream. Trans. Am. Fish. Soc. 118: 379-385.

Table 1: Mean temperature, dissolved oxygen, and conductivity of surface and interstitial water during spawning, incubation, and emergence periods. Data are means \pm SD with sample size in parentheses. For each period and parameter, data with different letters are significantly different as determined by a paired t-test ($p < 0.05$).

	Temperature (°C)		Dissolved oxygen (mg·L ⁻¹)		Conductivity (μ S·cm ⁻¹)	
	Surface	Interstitial	Surface	Interstitial	Surface	Interstitial
Spawning period	2.93 \pm 1.18a (34)	3.35 \pm 0.96a (34)	11.80 \pm 1.12a (43)	9.77 \pm 2.13b (43)	ND	ND
Incubation period	0.77 \pm 0.25a (62)	0.67 \pm 0.26b (62)	12.09 \pm 1.97a (58)	10.44 \pm 2.45b (58)	7.70 \pm 0a (20)	8.23 \pm 1.54a (20)
Emergence period	12.71 \pm 1.75a (36)	12.57 \pm 1.71b (36)	8.73 \pm 1.18a (36)	7.31 \pm 1.44b (36)	7.50 \pm 0a (16)	6.45 \pm 0.64b (16)

ND: no data available

Table 2: Mean surface water velocity and depth during spawning, incubation, and emergence periods at selected and non-selected sites. Data are means \pm SD with sample size in parentheses. For each period and parameter, means with different letters are significantly different as determined by a t-test ($p < 0.05$).

	Surface water velocity ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)		Depth (cm)	
	Selected sites	Non-selected sites	Selected sites	Non-selected sites
Spawning period	24.21 \pm 19.29a (16)	14.21 \pm 17.79a (16)	49.18 \pm 11.65a (34)	45.97 \pm 13.63a (34)
Incubation period	15.43 \pm 6.39a (34)	8.18 \pm 5.86b* (33)	37.44 \pm 13.56a (34)	36.29 \pm 14.35a (34)
Emergence period	46.68 \pm 17.48a (30)	28.48 \pm 14.68b* (30)	66.00 \pm 18.53a (30)	64.33 \pm 15.38a (30)

*: $p < 0.001$

Table 3: Mean interstitial water flow during the spawning, incubation, and emergence periods at selected and non-selected sites in 1997 (sampling depth: 25-35 cm) and in 1998 (sampling depth: 5-15 cm). Data are means \pm SD with sample size in parentheses. For each period and parameter, means with different letters are significantly different as determined by a t-test ($p < 0.05$).

	Interstitial water flow (25-35 cm) ($\times 10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$)		Interstitial water flow (5-15 cm) ($\times 10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	
	Selected sites	Non-selected sites	Selected sites	Non-selected sites
Spawning period	3.33 \pm 2.22a (11)	5.80 \pm 3.16b (11)	ND	ND
Incubation period	3.43 \pm 3.22a (23)	5.07 \pm 3.69a (19)	76.33 \pm 11.61a (8)	56.83 \pm 17.83b (7)
Emergence period	1.39 \pm 1.14a (10)	2.42 \pm 1.84a (11)	45.09 \pm 25.50a (8)	29.51 \pm 17.82a (6)

ND: no data available

Table 4: Geometric mean diameter (Dg), geometric standard deviation (So) of particles, fredle index of substrate and sediment loading at selected and non-selected sites. Data are means \pm SD with sample size in parentheses. For each parameter, data with different letters are significantly different as determined by a *t*-test (Dg) and a Mann-Whitney *U*-test (So, fredle index, sediment loading) ($p < 0.05$).

	Dg (mm)	So	Fredle index	Sediment loading (g)
Selected sites	11.17 \pm 3.98a (16)	1.72 \pm 0.30a (16)	6.91 \pm 3.29a (16)	75.38 \pm 64.66a (9)
Non selected sites	7.69 \pm 2.58b* (16)	2.66 \pm 1.21b* (16)	3.72 \pm 2.37b* (16)	83.27 \pm 91.22a (13)

*: $p < 0.01$

Table 5: Mean percent hatching and emergence (\pm SD) at selected and non-selected sites and in astro-turfTM, and in selected and non-selected substrates. For each developmental stage, means with different letters are significantly different as determined by a two-way ANOVA followed by a Tukey multiple sample comparison test ($p < 0.05$).

	Site			Substrate		Site x substrate
	Selected	Non selected	Astro-turf TM	Selected	Non-selected	
% hatching	12.44 \pm 13.23a (41)	17.29 \pm 19.54a (44)	22.93 \pm 19.87a (25)	13.19 \pm 14.77ab (32)	9.84 \pm 13.96b* (28)	N.S.
% emergence	8.09 \pm 10.01a (41)	12.73 \pm 16.79a (44)	16.09 \pm 17.46a (25)	8.22 \pm 10.60ab (32)	8.10 \pm 13.15b (28)	N.S.

*: $p < 0.01$

N.S. : not significant

Figure captions:

Figure 1: Schematic representation of the experimental design. Cylinders represent the incubators.

Figure 2. Mean proportion of particle size classes (diameter, mm) at selected and non-selected sites. Bars are means \pm SD. For each particle size class, data with different letters are significantly different as determined by a *t*-test ($p < 0.05$).

Figure 3: Mean cumulative proportion of particle size classes at selected and non-selected sites. Bars are means \pm SD. For each particle size class, data with different letters are significantly different as determined by a *t*-test ($p < 0.05$).

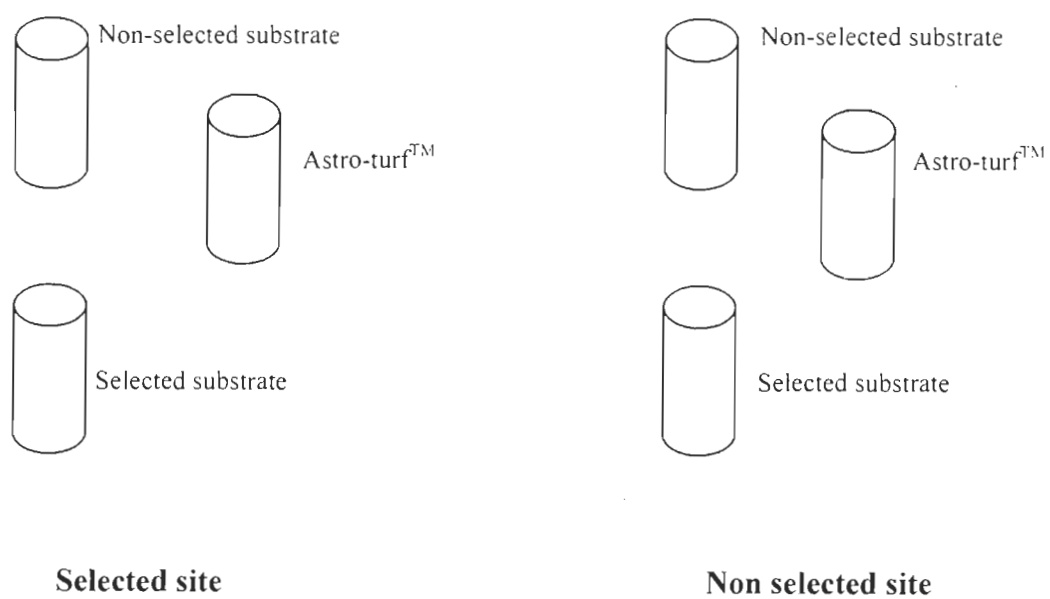


Figure 1

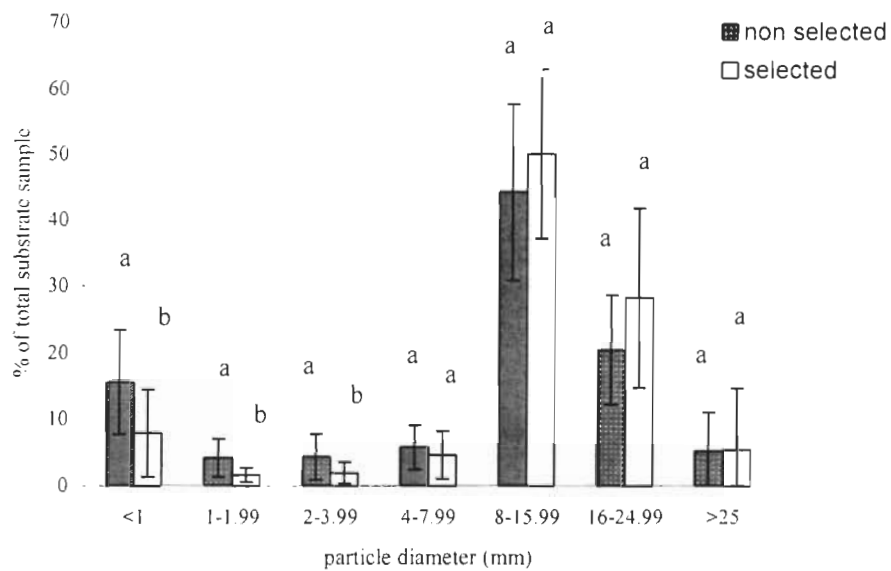


Figure 2

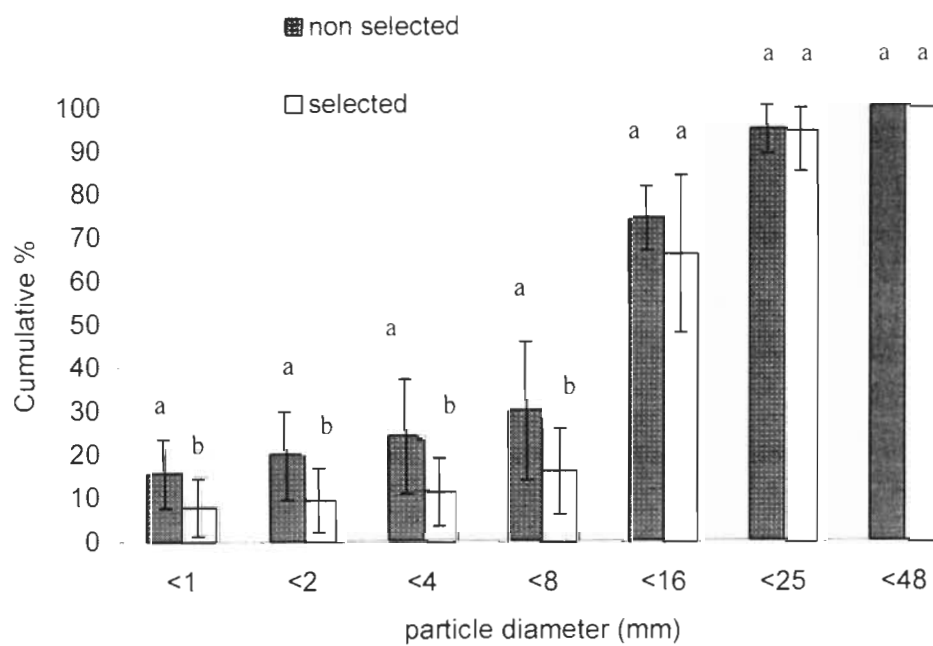


Figure 3

RÉSUMÉ DÉTAILLÉ EN FRANÇAIS

Introduction

Des études récentes suggèrent que les résurgences d'eau souterraine seraient déterminantes dans la sélection d'un site de fraye (Webster et Eiriksdottir 1976, Fraser 1982, 1985, Witzel et MacCrimmon 1983a, Snucins et al. 1992, Blanchfield et Ridgway 1997, Essington et al. 1998). En plus d'assurer une stabilité aux embryons, l'eau souterraine apporte l'oxygène tout en retirant les métabolites produits (Fraser 1985, Gunn 1986, Snucins et al. 1992, Curry et al. 1995). En rivière, ces fonctions peuvent être assurées par l'eau de surface qui passe à travers le substrat (Stuart 1953, Fraser 1985).

La disponibilité d'un substrat adéquat peut aussi influencer la sélection d'un site et le succès de reproduction. Même si le gravier est le substrat le plus adéquat, l'omble de fontaine a été observé frayant sur un substrat atypique en présence de résurgences d'eau souterraine (Fraser 1982). Toutefois, une grande proportion de particules fines réduit l'apport d'oxygène aux embryons (Witzel et MacCrimmon 1983b, Chapman 1988).

La sélection à petite échelle d'un site de fraye et son impact sur les succès d'éclosion et d'émergence demeurent peu connus. Une plus grande connaissance des facteurs impliqués est nécessaire dans un contexte d'aménagement.

L'objectif principal de cette étude était d'étudier les facteurs contribuant à la sélection d'un site de fraye à petite échelle, aux succès d'éclosion et d'émergence chez l'omble de fontaine dans une frayère aménagée. Nous avons mesuré l'importance relative de la vitesse du courant, de la profondeur, des résurgences d'eau souterraine, de la

granulométrie du substrat et de la physico-chimie sur ces variables, dans l'émissaire d'un lac qui avait été aménagé pour augmenter la production en omble de fontaine.

Matériel et méthodes

L'étude s'est déroulée dans l'émissaire principal du lac St-Michel, Québec, Canada (47°10'N, 71°02'O). Cet émissaire a été aménagé de 1986 à 1990, pour augmenter la disponibilité des habitats de reproduction de l'omble de fontaine. En 1997 et 1998, nous avons incubé des oeufs dans 16 sites sélectionnés par les géniteurs d'omble de fontaine et dans 16 sites non sélectionnés. Tous les sites contenaient 3 incubateurs placés en triangle (1 en amont et 2 en aval; Figure 1). Les incubateurs utilisés ont été fabriqués spécialement pour les besoins de ce projet. Afin de mesurer la contribution relative du substrat et des facteurs hydrologiques, les œufs étaient incubés dans (i) de l'Astro-turfTM, (ii) du substrat sélectionné, et (iii) du substrat non sélectionné (Figure 1). L'Astro-turfTM est un substrat artificiel qui maximise la survie des œufs (Lachance et al. 2000).

L'oxygène dissous ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) et la température ($^{\circ}\text{C}$) de l'eau de surface et interstitielle ont été mesurés à l'aide d'un oxymètre YSI (modèle 57) et la conductivité ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) à l'aide d'un conductivimètre YSI (modèle 33). Une pointe de Teflon perforée et reliée à une pompe a été utilisée afin de prendre les mesures dans le substrat.

La vitesse du courant aux différents sites a été mesurée à 10 cm du lit de la rivière à l'aide un courantomètre (Price-type Mini current meter, model 1205). Afin de mesurer les

résurgences d'eau souterraine, des mini-piezomètres ont été utilisés (Lee et Cherry, 1978). Les mini-piezomètres ont été construits selon la procédure décrite par Curry et Noakes (1995). Les mini-piezomètres ont été insérés dans le substrat afin que l'eau échantillonnée soit à une profondeur de 25-35 cm. Suite aux résultats obtenus la première année, nous avons modifié la profondeur d'échantillonnage à 5-15 cm en 1998. Le débit de l'eau interstitielle a été mesuré à l'aide de la formule de Darcy :

$$Q = A \frac{dh}{dl} K$$

où Q est le débit ($\text{cm}^3 \text{s}^{-1}$), A est l'aire à travers laquelle l'eau circule (cm^2), dh/dl est le gradient hydraulique et K est la perméabilité du substrat (cm s^{-1}). Ces variables ont été mesurées selon Lee et Cherry (1978).

Le substrat a été échantillonné à l'aide d'un échantillonneur McNeil. Après avoir séché et passé l'échantillon à travers une série de tamis, différents indices ont été calculés :

- La proportion des différentes classes de taille de particules formant le substrat.
- Le diamètre géométrique moyen des particules (D_g):

$$D_g = (d_1^{w_1} \times d_2^{w_2} \times \dots \times d_n^{w_n})$$

où D_g est le diamètre géométrique moyen des particules, d_n le diamètre médian des particules retenues par le nième tamis et w_n est la fraction décimale du poids des particules retenues sur le nième tamis.

- L'indice de fredle:

$$f_i = d_g / S_0 ,$$

$S_0 = (d_{75} / d_{25})^{1/2}$, où d_{75} et d_{25} sont les diamètres des particules à 75% et 25% du poids de l'échantillon.

Analyses statistiques

L'oxygène dissous, la température de l'eau et la conductivité ont été comparés entre l'eau de surface et interstitielle à l'aide de test-t pour données appariées (Sokal et Rohlf 1981). Quant aux variables mesurées aux sites sélectionnés et non sélectionnés, elles ont été comparés à l'aide de test-t ou encore de test-U de Mann-Whitney (Sokal et Rohlf 1981). L'effet du substrat (Astro-turfTM, sélectionné et non sélectionné) et du site (sélectionné et non sélectionné) a été comparé à l'aide d'une analyse de variances à deux facteurs suivie d'un test de comparaisons multiples de Tukey (Sokal et Rohlf 1981). Les analyses statistiques ont toutes été effectuées avec le logiciel SYSTAT (version 8.0).

Résultats

La température moyenne était significativement plus élevée dans l'eau de surface que dans le substrat pendant la période d'incubation et d'émergence mais pas durant la période de fraye (fraye: $t = 0.69$, $p > 0.05$; incubation: $t = 3.22$, $p < 0.01$; émergence: $t = 2.75$, $p < 0.01$; Tableau 1). L'oxygène dissous était significativement plus élevé dans l'eau de surface que dans le substrat pour les trois périodes (fraye: $t = 5.33$, $p < 0.001$; incubation: $t = 5.68$, $p < 0.001$; émergence: $t = 6.69$, $p < 0.001$; Tableau 1). La conductivité était significativement plus élevée dans l'eau de surface que dans le substrat pour la période d'émergence seulement (fraye: ND; incubation: $t = 1.53$, $p > 0.05$; émergence: $t = 4.70$, $p < 0.001$; Tableau 1).

La vitesse de l'eau de surface était significativement plus élevée aux sites sélectionnés que non sélectionnés pendant la période d'incubation et d'émergence (fraye: $t = 1.52$, $p > 0.05$; incubation: $t = 4.85$, $p < 0.001$; émergence: $t = 4.37$, $p < 0.001$; Tableau 2). Aucune différence significative n'a été observée entre la profondeur aux sites sélectionnés et non sélectionnés (fraye: $t = 1.04$, $p > 0.05$; incubation: $t = 0.34$, $p > 0.05$; émergence: $t = 0.38$, $p > 0.05$; Tableau 2). En 1997, le débit d'eau interstitielle moyen (mesuré à 25-35 cm) était significativement plus élevé aux sites non sélectionnés qu'aux sites sélectionnés pendant la période de fraye seulement (fraye: $t = 2.15$, $p < 0.05$; incubation: $t = 1.52$, $p > 0.05$; émergence: $t = 1.55$, $p > 0.05$; Tableau 3). En 1998, le débit d'eau interstitielle moyen (mesuré à 5-15 cm) était significativement plus élevé aux sites sélectionnés qu'aux sites non sélectionnés pendant la période d'incubation seulement (fraye: ND; incubation: $t = 2.47$, $p < 0.05$; émergence: $t = 1.35$, $p > 0.05$; Tableau 3).

Les particules <1 mm, de 1 à 1.99 mm, et de 2 à 3.99 mm étaient significativement plus abondantes dans les sites non sélectionnés que dans les sites sélectionnés (< 1 mm: $t = 3.08$, $p < 0.01$; 1-1.99 mm: $t = 3.33$, $p < 0.01$; 2-3.99 mm: $t = 2.53$, $p < 0.05$; 4-7.99 mm: $t = 0.98$, $p > 0.05$; 8-15.99 mm: $t = 1.24$, $p > 0.05$; 16-24.99 mm: $t = 1.94$, $p > 0.05$; >25 : $t = 0.28$, $p > 0.05$; Figure 2). Les pourcentages cumulatifs des particules plus petites que 1, 2, 4 et 8 mm étaient significativement plus élevés dans les sites non sélectionnés que dans les sites sélectionnés (<1 : $t = 3.08$, $p < 0.01$; < 2 : $t = 3.29$, $p < 0.01$; < 4 : $t = 3.28$, $p < 0.01$; < 8 : $t = 2.90$, $p < 0.01$; <16 : $t = 1.54$, $p > 0.05$; < 25 : $t = -0.06$, $p > 0.05$; Figure 3). Le diamètre géométrique moyen des particules et l'indice de fredle étaient

significativement plus élevés dans les sites sélectionnés que dans les sites non sélectionnés (Dg: $t = 2.94$, $p < 0.01$; fredle index: $U = 57.00$, $p < 0.01$; Tableau 4). À l'opposé, le coefficient de tri (So) du substrat était significativement plus élevé dans les sites non sélectionnés que dans les sites sélectionnés ($U = 199.00$, $p < 0.01$; Tableau 4). L'accumulation de particules fines pendant la période d'incubation n'était pas significativement différente dans les sites sélectionnés et non sélectionnés ($U = 56.00$, $p > 0.05$; Tableau 4). Toutefois, l'accumulation de sédiments pendant la période d'incubation était corrélée avec la proportion de particules plus fines que 1 et 2 mm dans le substrat (1 mm: $r = 0.49$, $p < 0.05$; 2 mm: $r = 0.45$, $p < 0.05$).

L'analyse de variance à deux facteurs a démontré que le site n'avait pas d'effet sur les succès d'éclosion et d'émergence (sélectionné versus non sélectionné; éclosion: $F = 0.62$; $p > 0.05$; émergence: $F = 1.08$, $p > 0.05$) mais que le substrat d'incubation (Astro-turfTM, sélectionné, non sélectionné) avait un effet significatif sur les deux stades de développement (éclosion: $F = 4.93$, $p < 0.01$; émergence: $F = 3.51$, $p < 0.05$; Tableau 5). Un test de comparaison multiple de Tukey a par la suite démontré que les pourcentages d'éclosion et d'émergence étaient significativement supérieurs dans l'Astro turfTM que dans le substrat non sélectionné et que le substrat sélectionné présentait des valeurs intermédiaires.

Discussion

Les différences observées entre la physico-chimie de l'eau de surface et de l'eau interstitielle ne suggèrent pas la présence de résurgence d'eau souterraine. L'eau qui circule dans le substrat provient plutôt de la surface. Ce type d'alimentation offre des conditions moins stables aux embryons que l'eau souterraine.

La profondeur ne semble pas impliquée dans le processus de sélection d'un site de fraye. Ceci peut être expliqué par le fait que les sites non sélectionnés ont été consciemment choisis près des sites sélectionnés (< 3 m) ou encore par le fait que d'autres facteurs reliés au micro-habitat étaient plus importants. La vitesse de l'eau de surface semble être impliquée dans la sélection d'un site de fraye. En effet, elle était significativement plus élevée aux sites sélectionnés qu'aux sites non sélectionnés.

Les différences observées dans la vitesse de l'eau interstitielle mesurée aux sites sélectionnés et non sélectionnés ne sont pas consistantes et ne démontrent pas de tendance claire. Nos résultats suggèrent que la vitesse de l'eau interstitielle n'était pas un facteur impliqué dans la sélection d'un site de fraye ou encore que le critère minimum était satisfait sur toute l'aire de fraye.

La proportion de particules fines semble être un facteur déterminant dans la sélection d'un site de fraye. En effet, leur proportion était significativement plus élevée aux sites non sélectionnés qu'aux sites sélectionnés. La plus petite proportion de particules fines

dans les sites sélectionnés a entraîné un diamètre géométrique moyen des particules et un fredle index plus élevés. Le substrat sélectionné était donc plus grossier et plus homogène que le substrat non sélectionné. Les succès d'éclosion et d'émergence suggèrent que la survie des embryons est davantage associée au substrat d'incubation qu'aux autres caractéristiques du site.

En conclusion, les résultats de cette étude suggèrent que la sélection d'un site de fraye à petite échelle est principalement basée sur la vitesse du courant et les caractéristiques du substrat (granulométrie et particules fines), qui à leur tour influencent la survie, dans une frayère aménagée. Cependant, la nature artificielle du site à l'étude ne permet pas la généralisation de ces conclusions aux habitats naturels. Bien que le site ait été soumis aux conditions naturelles pendant 10 ans, l'aménagement a réduit sa variabilité du milieu physique. Ceci peut avoir limité la sélection des sites de fraye par l'omble de fontaine. La qualité du substrat et la réduction de l'apport de sédiment fins durant l'incubation devrait donc être prises en compte lors d'aménagements de frayère.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES DE LA RÉTROSPECTIVE DE LA
LITTÉRATURE

- Blanchfield, P.J., Ridgway, M.S. 1997. Reproductive timing and use of redd sites by lake-spawning brook trout (*Salvelinus fontinalis*). Can. J. Aquat. Sci. **54**: 747-756.
- Chapman, D.W. 1988. Critical review of variables used to define effects of fines in redds of large salmonids. Trans. Am. Fish. Soc. **117**: 1-21.
- Coble, D.W. 1961. Influence of water exchange and dissolved oxygen in redds on survival of steelhead trout embryos. Trans. Am. Fish. Soc. **90**: 469-474.
- Curry, R.A., Noakes, D.L.G. 1995. Groundwater and the selection of spawning sites by brook trout (*Salvelinus fontinalis*). Can. J. Fish. Aquat. Sci. **52**: 1733-1740.
- Curry, R.A., Noakes, D.L.G., Morgan, G.E. 1995. Groundwater and the incubation and emergence of brook trout (*Salvelinus fontinalis*). Can. J. Fish. Aquat. Sci. **52**: 1741-1749.
- Curry, R.A., Gehrels, J., Noakes, D.L.G., Swainson, R. 1994. Effects of river flow fluctuations on groundwater discharge through brook trout, (*Salvelinus fontinalis*), spawning and incubation habitats. Hydrobio. **277**: 121-134.
- Direction générale des politiques et des analyses économiques. 1997. Enquête sur la pêche récréative au Canada, 1995. Rapport n° 154: 128 p.
- Essington, T.E., Sorenson, P.W., Paron, D.G. 1998. High rate of redd superimposition by brook trout (*Salvelinus fontinalis*) and brown trout (*Salmo trutta*) in a Minnesota stream cannot be explained by habitat availability alone. Can. J. Fish. Aquat. Sci. **55**: 2310-2316.

- Fraser, J.M. 1982. An atypical brook charr (*Salvelinus fontinalis*) spawning area. Env. Biol. Fish. 7: 385-388.
- Fraser, J.M. 1985. Shoal spawning of brook trout, (*Salvelinus fontinalis*), in a precambrian shield lake. Nat. Can. 112: 163-174.
- Gunn, J.M. 1986. Behaviour and ecology of salmonid fishes exposed to episodic pH depressions. Env. Bio. Fish. 17: 241-252.
- Hausle, D.A., Coble, D.W. 1976. Influence of sand in redds on survival and emergence of brook trout (*Salvelinus fontinalis*). Trans. Am. Fish. Soc. 1: 57-63.
- Kondolf, G.M., Wolman, M.G. 1993. The sizes of salmonid spawning gravels. Water Resour. Res. 29: 2275-2285.
- Kondolf, G.M., Sale, M.J., Wolman, M.G. 1993. Modification of fluvial gravel size by spawning salmonids. Water Resour. Res. 29: 2265-2274.
- Lotspeich, F.B., Everest, F.H. 1981. A new method for reporting and interpreting textural composition of spawning gravel. USDA For. Serv. Res. Note PNW-369.
- MacCrimmon, H.R., Gots, B.L. 1986. Laboratory observations on emergent patterns of juvenile Atlantic salmon, *Salmo salar*, relative to sediment loadings of test substrate. Can. J. Zool. 64: 1331-1336.
- Mason, J.C. 1969. Hypoxial stress prior to emergence and competition among coho salmon fry. J. Fish. Res. Bd. Can. 26: 63-91.
- Pollard, R.A. 1955. Measuring seepage through salmon spawning gravel. J. Fish. Res. Bd. Can. 12: 706-741.
- Rubin, J.F. 1995. Estimating the success of natural spawning of salmonids in streams. J. Fish Bio. 46: 603-622.

- Rubin, J.F., Glimsäter, C. 1996. Egg-to-fry survival of the sea trout in some streams of Gotland. *J. Fish Bio.* 48: 585-606.
- Snucins, E.J., Curry, R.A., Gunn, J.M. 1992. Brook trout (*Salvelinus fontinalis*) embryo habitat and timing of alevin emergence in a lake and a stream. *Can. J. Zool.* 70: 423-427.
- Sowden, T.K., Power, G. 1985. Prediction of rainbow trout embryo survival in relation to groundwater seepage and particle size of spawning substrates. 1985. *Trans. Am. Fish. Soc.* 114: 804-812.
- Tappel, P.D., Bjornn, T.C. 1983. A new method of relating size of spawning gravel to salmonid embryo survival. *North Am. J. Fish. Manag.* 3: 123-135.
- Webster, D.A., Eiriksdottir, G. 1976. Upwelling water as a factor influencing choice of spawning sites by brook trout (*Salvelinus fontinalis*). *Trans. Am. Fish. Soc.* 3: 416-421.
- Witzel, L.D., MacCrimmon, H.R. 1981. Role of gravel substrate on ova survival and alevin emergence of rainbow trout, *Salmo gairdneri*. *Can. J. Zool.* 59: 629-636.
- Witzel, L.D., MacCrimmon, H.R. 1983a. Redd-site selection by brook trout and brown trout in southwestern Ontario streams. *Trans. Am. Fish. Soc.* 112: 760-771.
- Witzel, L.D., MacCrimmon, H.R. 1983b. Embryo survival and alevin emergence of brook charr, (*Salvelinus fontinalis*), and brown trout, (*Salmo trutta*), relative to redd gravel composition. *Can. J. Zool.* 61: 1783-1792.

ANNEXE A

A new incubator for salmonid egg incubation and collection of emergent larvae¹

Isabel Bernier-Bourgault

François Guillemette

Pierre Magnan²

Département de chimie-biologie

Université du Québec à Trois-Rivières

C.P. 500, Trois-Rivières (Québec) Canada

G9A 5T6

1: Contribution of the Centre de recherche Gesti-Faune inc.

2: Author to whom correspondence should be addressed

Abstract

We devised a new incubator to estimate egg-to-emergence success of brook trout (*Salvelinus fontinalis*) embryos. This incubator is cylindrical, made of a PVC grid that allows water to flow through from all directions, and connected to an emergence trap with a coupler. The emergence success of eggs in these incubators was $72.9 \pm 9.6\%$ under laboratory conditions compared to $18.0 \pm 20.0\%$ under field conditions. The emergence success observed in the field is comparable to a direct estimation made on the same spawning ground. The higher mortality observed in the field is probably related to sediment accumulation, which ranged from 0 to 281.2 g in our experiment. This incubator is easy to use and its insertion into the substrate prevents any substrate compaction. It can be used to follow emergence timing since the emergence trap may be removed and replaced easily without disturbing the incubator.

Introduction

Incubators are often used to estimate egg-to-emergence survival of salmonids subjected to different environmental conditions. The incubator described by Vibert (1949) has been used in many studies including Hansen (1975), Reiser (1976), Harshbarger and Porter (1982), and Tappel and Bjornn (1983). Harshbarger and Porter (1982), who used a modified Whitlock-Vibert box, noted that sediment deposition accounted for differences in survival between box plants and direct plants. Gustafson-Marjanen and Moring (1984) argued that incubation boxes do not imitate natural redd survival and developed a technique mimicking redd construction and egg implantation. Although direct plants may be useful for stocking salmonid populations, they cannot be used to accurately estimate egg-to-emergence survival. Witzel (1980) used a modified incubation box to estimate brown trout (*Salmo trutta*) and brook trout (*Salvelinus fontinalis*) survival. Although his incubation box was efficient, the collection of larvae in the emergence trap required different techniques depending on the current speed. Jeric et al. (1995) adapted the incubation basket of Burton et al. (1990) to incubate kokanee (*Oncorhynchus nerka*) eggs. Our paper reports on a new incubator devised to estimate egg-to-emergence survival of brook trout embryos. This incubator is inserted into the substrate and allows one to easily sample emerging larvae.

Material and methods

The incubator is cylindrical (12.3 cm height x 8.1 cm diameter) and made of a PVC grid (slots of 20 mm x 1.5 mm) that allows water to flow through from all directions (Figure

1). A fry trap is set on the top of the incubator to catch the emergent larvae. The trap (10.0 height cm x 8.1 cm diameter), also made of PVC, is fixed over the incubator with a coupler. An inverted funnel inside the trap directs the emergent larvae into the trap. The emergence trap is also slotted to allow for oxygenation. The PVC coupler is fixed on the incubator and allows easy removal and replacement of the trap. During emergence, the funnel's cap may be removed to allow easy sampling of the larvae.

To evaluate the efficiency of this incubator, we estimated the survival to emergence of brook trout (*Salvelinus fontinalis*) embryos in a natural stream and in the laboratory. The survival rates were also compared to a direct estimation done by Baril and Magnan (2000) on the same spawning ground. The field site was located in the outlet of Lake St-Michel, Charlevoix (Québec) Canada (47°10'N, 71°02'W), at 840 m of altitude. The outlet had been enhanced from 1987 to 1989 to increase the availability of spawning ground for brook trout (Craig and Dulude, 1995). In 1997, ripe individuals were captured with a seine (10 m x 1.5 m x 1 cm) in a pool located in a tributary of Lake St-Michel. Males and females were kept in separate enclosures until artificial fertilization using the dry method (Piper et al. 1982). In the stream, the eggs were incubated on layers of Astro-turfTM (six 8 cm diameter disks fitted into the incubators) and on natural substrate. Astro-turfTM is an artificial substrate that maximizes egg survival (Lachance et al. 2000). Furthermore, it allowed us to estimate the fine particle sedimentation during the incubation period. The natural substrate was taken from spawning grounds selected by reproducing individuals (Bernier-Bourgault and Magnan 2000). We placed 100 fertilized

eggs into each of the 13 incubators containing Astro-turfTM and the 20 containing natural substrate.

We used a 12-cm diameter PVC tube to insert the incubators into the ground. The tube was embedded in the substrate to a depth of about 12 cm. The substrate within the tube was removed, the incubator slipped into the empty space, and then the PVC tube was removed. We used the removed substrate to fill the space around the incubator. This technique avoided any substrate compaction around the incubators. The removed substrate was also used as the incubation substrate in the incubators. The emergence trap was placed over the incubator. The eggs were incubated from 1 to 10 cm depth, which is the usual depth for egg burial in brook trout (<15 cm; DeVries, 1997). Finally, the incubator was secured to a rod that was set downstream of the incubator. The egg-to-emergence survival was estimated by comparing the number of eggs incubated and number of larvae sampled in the emergence trap.

To test the efficiency of this incubator under controlled conditions, we incubated eggs from the same batch in the laboratory. Six incubators containing 100 eggs each were set in a circular tank. The incubation substrate consisted of 8-cm disks of Astro-turfTM in each of these incubators. To evaluate the effect of the incubator structure on egg survival, six series of Astro-turfTM disks containing 100 eggs each were also incubated in the tank. Each of these series consisted of six 8-cm diameter disks held together with tie-wraps. Because there was no structure retaining the emerging larvae, emergence success was estimated from the initial number of eggs in the six series of Astro-turfTM disks (600

eggs) and the number of larvae found in the tank. Mean water temperature and dissolved oxygen were respectively 7°C and 14 mg/l during the incubation period.

Results

The emergence success in the incubator containing natural substrate was not significantly different from that observed in incubators containing Astro-turfTM in the field ($t = 1.55$; $p > 0.05$; Table 1). The percent emergence success in incubators containing natural substrate ranged from 0 to 44% compared to 0 to 68% in incubators with Astro-turfTM. The mean weight of fine particles accumulated in the Astro-turfTM during the incubation period was $70.74 \text{ g} \pm 103.14$ and ranged from 0 to 281.2 g.

In the laboratory, the emergence success in Astro-turfTM alone (75.1%) was comparable to that in the incubators with Astro-turfTM (72.9%). No statistical analysis could be done to compare these two values because emergence success in Astro-turfTM alone was an overall estimation from the six series of Astro-turfTM disks (see Material and Methods section). The emergence success ranged from 63.9% and 85.9% in the incubators.

Discussion

The percentages of emergence success in Astro-turfTM alone and with Astro-turfTM in the incubators were close enough to conclude that the incubator structure had no or a negligible impact on egg mortality.

The emergence success varied between 18% (Astro-turfTM) and 10% (natural substrate) in the field. While these values may seem low compared to those observed in the laboratory, they are comparable to the direct estimation done by Baril and Magnan (2000) on the same spawning ground. These authors reported an emergence success of 13.3% when comparing the total egg production of the spawning ground and an estimation of total pre-emerging larvae on the same spawning ground (Surber samples).

The higher mortality observed in the field may be related to sediment accumulation in the natural environment. A relatively large quantity of fine sediment accumulated in some incubators. Five incubators experienced a fine sediment accumulation of 7 g or less while the eight others had accumulations ranging from 47.0 to 281.2 g. These differences were probably caused by the varying substrate characteristics at each site (Bernier-Bourgault and Magnan, in prep.). No relation have been found between emergence success and sediment loading because of the large variance of this last variable.

In conclusion, the incubator described in this paper was efficient and had a hatching success comparable to that in the natural environment. It is easy to use, its insertion into the substrate prevents any substrate compaction, and it requires only common tools. The collection of emergent larvae is easy and does not require any additional equipment. The incubator can also be used to follow emergence succession since the trap can be removed and replaced easily without disturbing the incubator. The cost of the material needed to make one of these incubators was about \$10 (CAN) in 1997.

Acknowledgments

We thank M. Baril, G. Bernier, P. Brodeur, P. East, S. Garceau, F. Guillemette, S. Labrie, G. Lacroix, F. Marchand, and I. St-Onge for their field assistance. We also thank R. Robert for his help in building the incubators. This study was supported by the Centre de recherche Gesti-Faune inc.

References

- Baril, M. and P. Magnan. 2000. Movements, diel activity, and hatching success of lacustrine brook charr, *Salvelinus fontinalis*, spawning in a lake outlet. Environmental Biology of Fishes (submitted).
- Bernier-Bourgault, I., and P. Magnan. 2000. Factors affecting small-scale redd site selection, and hatching and emergence success of brook charr (*Salvelinus fontinalis*) in streams. Environmental Biology of Fishes (submitted).
- Burton, T. A., G. W. Harvey, and M. L. McHenry. 1990. Protocols for assessment of dissolved oxygen, fine sediment and salmonid embryo survival in an artificial redd. Idaho Department of Health and Welfare, Water Quality Monitoring Protocols, Report 1, Boise.
- Craig, D., and P. Dulude. 1995. Historique de l'aménagement d'une frayère pour la truite mouchetée au lac St-Michel, Club le Manoir Brûlé. Centre de recherche Gesti-Faune inc. Stoneham, Québec.
- DeVries, P. 1997. Riverine salmonid egg burial depths: review of published data and implications for scour studies. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences 54:1685-1698.
- Gustafson-Marjanen, K. I., and J. R. Moring. 1984. Construction of artificial redds for evaluating survival of Atlantic salmon eggs and alevins. North American Journal of Fisheries Management 4:455-461.
- Harshbarger, T. J., and P. E. Porter. 1982. Embryo survival and fry emergence from two methods of planting brown trout eggs. North American Journal of Fisheries Management 2:84-89.

- Hansen, E. A. 1975. Some effects of groundwater on brown trout redds. Transactions of the American Fisheries Society 1:100-110.
- Jeric, R. J., T. Modde, and J. M. Godfrey. 1995. Evaluation of a method for measuring intragravel dissolved oxygen concentrations and survival to emergence in shore-spawned salmonids. North American Journal of Fisheries Management 15:185-192.
- Lachance, S., P. Bérubé, and M. Lemieux. 2000. In situ survival and growth of three brook trout strains, *Salvelinus fontinalis*, subjected to acid conditions of anthropogenic origin at the egg and fingerling stages. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences. 57:1562-1573.
- Piper, R.G., I.B. McElwain, L.E. Orme, J.P. McCraren, L.G. Fowler & J.R. Leonard. 1982. Fish hatchery management. U.S. Department of the Interior, Fish and Wildlife Service, Washington. 517 pp.
- Reiser, D. W. 1976. Determination of physical and hydraulic preferences of brown trout and brook trout in the selection of spawning locations. Master's thesis. University of Wyoming, Laramie.
- Tappel, P. D., and T. C. Bjornn. 1983. A new method of relating size of spawning gravel to salmonids embryo survival. North American Journal of Fisheries Management 3:123-135.
- Witzel, L. D. 1980. Relation of gravel size to spawning site selection and alevin production by *Salvelinus fontinalis* and *Salmo trutta*. Master's thesis. University of Guelph. Guelph Ontario.

Vibert, R. 1949. Du repeuplement en truites et saumons par enfouissement de "boîtes d'alevinage" garnies d'œufs dans les graviers. Bulletin Français de Pisciculture 153:125-150.

Table 1: Mean percent mortality with standard deviation (SD) in the laboratory and field experiments for different incubation substrates. Sample size is in parentheses. Means with the same letters are not significantly different as determined by a *t*-test ($p > 0.05$).

	<i>Astro-turf</i> TM alone (control)		Incubator with Astro-turf		Incubator with natural substrate	
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
Laboratory	75.1% ¹	na	72.9%	9.6%		
Experiment			(6)			
Field			18.0% ^a	20.0%	10.1% ^a	12.0%
experiment			(13)		(20)	

1: Overall mortality estimated from the six series of *Astro-turf*TM disks

na: SD could not be determined (see text)

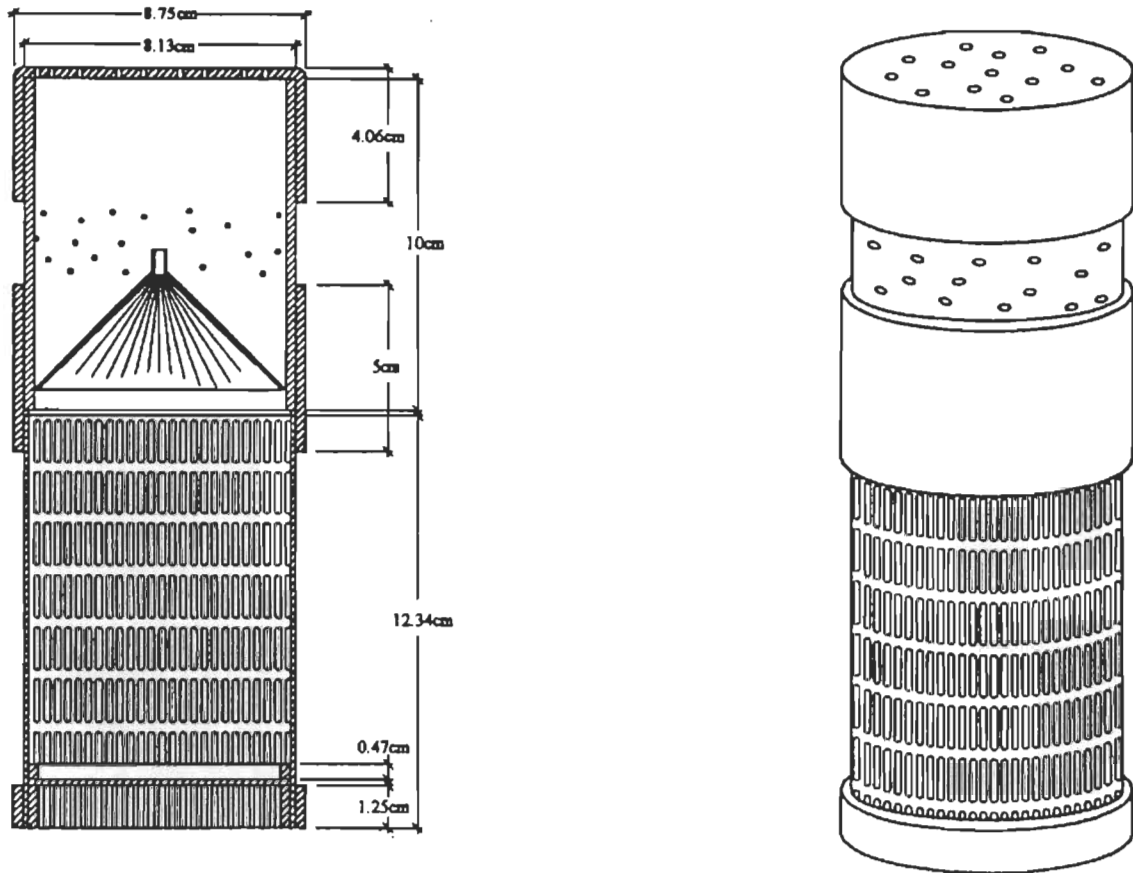


Figure 1 : Diagram of the incubator used to estimate egg-to-emergence survival of brook trout in the natural environment and the laboratory.